

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－フィンランド研究交流）

1. 研究課題名：「非中心対称性結晶における超高速光電変換プロセス」
2. 研究期間：平成22年4月～平成25年3月
3. 支援額： 総額 14,250,000 円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	志村 努	東京大学	教授
研究者	黒田和男	東京大学	教授
研究者	佐藤琢哉	東京大学	助教
研究者	藤村隆史	東京大学	助教
研究者	吉峯 功	東京大学	大学院学生
参加研究者 のべ 5 名			

相手側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	Alexei A. Kamshilin	University of Eastern Finland	Professor
研究者	Ervin Nippola	University of Eastern Finland	Senior Researcher
研究者	Laure Fauch	University of Eastern Finland	PhD Student
参加研究者 のべ 3 名			

5. 研究・交流の目的

このプロジェクトの目的は、シレナイト系結晶($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$)や化合物半導体(GaAs, GaP, CdTe, GaN, AlN)等の非中心対称性結晶において、フェムト秒領域の光パルスによって誘起される、線形な光ガルバノ効果を観測することにある。また、パルス光に対する光ガルバノ効果を従来型の光自己相関によるレーザーパルスの波形測定システムに適用し、第二高調波を用いた同様のシステムに対して、その得失を明らかにする。

6. 研究・交流の成果

6-1 研究の成果

本研究交流では、東フィンランド大学カムシリ教授のグループと、東京大学志村教授のグループの共同研究により、以下の成果を得た。

まず、III-V属半導体であるGaPにおいて、フェムト秒パルスに対しても大きな光ガルバノ効果が発現することを確認した。光ガルバノ効果は、光照射により外部電場を掛けなくても電流が流れる現象であるが、従来は連続光照射、ナノ秒光パルス照射時にこの効果が発現することが知られていたが、ピコ秒、フェムト秒光パルスの照射時にもこの現象が現れるか、またその大きさは連続光照射時と変わらないか、という点は不明であった。われわれはこれらの点に関し、100fs程度の光パルスでも光ガルバノ効果は確かに表れ、しかもその大きさは連続光照射時と同程度であることを明らかにした。計測した電流の偏光依存

性、照射光強度依存性、通常の光電流と光ガルバノ電流の同時測定等を行い、観測した波形は間違いなく光ガルバノ電流であることを確認した。

また計測したフェムト秒光パルスに対する電流が、計測回路の時定数以下であることから、光ガルバノ電流はナノ秒以下の時間で停止していることが明らかになった。さらに発生した THz 波からは、照射した光電流に追従した波形の光ガルバノ電流が発生していることが示唆された。このことは光ガルバノ電流を用いて超高速な光パルス計測ができる可能性があることを示している。

光電流と光ガルバノ電流のそれぞれの光強度依存性と照射波長依存性の測定を行い、どちらの依存性も 2 種類の電流で良い一致を見たことから、光電流、光ガルバノ電流とも光キャリアを供給している不純物あるいは欠陥準位は共通であることが結論づけられた。

さらに光ガルバノ効果を用いた光相関測定を行い、理論通りの相関信号が得られた。また、これにより、光パルスのコヒーレンス長が計測できた。

また当初の計画には無かったが GaP 結晶において THz 電磁波を発生させ光ガルバノ電流によるテラヘルツ波発生の可能性を探った。従来はパルス光照射による THz 発生で、光子エネルギーがバンドギャップ幅よりも小さい場合、従来は光ガルバノ効果は起こらないと信じられていた。なぜなら、光ガルバノ効果はバンド間遷移が無ければ起こらないという、THz 波関係の研究者による誤解があったからである。しかしフォトリフレクティブ効果に関する研究者の間では、不純物あるいは欠陥による禁制帯内の準位からの励起により光ガルバノ効果は存在し、しかもかなり大きいということは良く知られており、その点で THz 波の発生メカニズムに関して新しい解釈の可能性を示した。

本研究ではフィンランド側の光ガルバノ効果に関する知識と経験、日本側のフェムト秒光パルスを用いた非線形光学等に関する実験の設備、経験、そして、両者の従来からの共通項であるフォトリフレクティブ効果に関する研究のバックグラウンドがうまく融合して、順調に研究が進行した。研究交流を通じて互いの得意分野を補い、相互に成長することができた。特に大学院学生がフィンランドの研究者と直接共同で実験を行うことにより、学生の実験スキルの著しい向上が見られた。

また日本側グループはフィンランド側から光ガルバノ効果に関する面白さを教えられ、研究のレパトリーを広げることができた。逆に日本側グループのフェムト秒光パルスを用いた非線形光学に関する実験技術はフィンランド側に伝えられ、彼らの実験のフィールドも広がった。

今後の課題は、さらに短いパルス、10 fs オーダーの光パルスに対してどうなるか、という点が一つである。また光ガルバノ電流が、照射した光パルスに対して、どれだけテールを引くか、という点も今後の検討課題である。光ガルバノ電流が、100 fs あるいは 10 fs オーダーの光パルスに対して、その包絡関数に忠実に比例しているとする、超高速の光パルスセンサーとなる可能性がある。また上述の THz 波の発生に対する光ガルバノ電流の関与も、解明すべき課題である。

6-2 人的交流の成果

今回の研究交流で、日本側とフィンランド側は種々議論を戦わせ、以前にもまして親密度が深まった。東フィンランド大学としても他大学との研究交流を促進しようとしており、今後の展開が期待できる。

大学院学生は、フィンランド側研究者の来日時に直接実験指導を受け、共同で実験を行うことにより、光ガルバノ効果に関する実験技術が飛躍的に向上した。また東フィンランド大学の Kamshilin 研究室を複数回訪問し、研究発表、実験、実験結果の検討を行った。国外の大学での研究環境に直接触れたことは貴重な経験であった。

フィンランド側の研究者は、日本滞在中にわれわれのフェムト秒光パルスを用いた実験設備、THz 波の発生方法などに直接触れ、技術を持ち帰り、今後の実験装置構築に役立てることができると考えている。フィンランド側の個々の研究者が今後独り立ちした場合には、

それがフィンランド以外の国の大学、研究期間であっても、共同研究を立ち上げられると考えている。

今後の展開としては、まずはフェムト秒光パルスに対する光ガルバノ効果の物理的メカニズムの解明を共同で進めたい。先に記したように、これに関してはまだすべてが明らかになったわけではない。光ガルバノ電流の波形は、フェムト秒光パルスにどこまで追従するのか、さらに短い 10 fs クラスの光パルスに対してはどのように応答するのか、などの点を今後、相互に連絡を取りつつ明らかにしたい。また THz 波の発生メカニズムとして光ガルバノ効果がどう関与しているのかも、未だ決着のついていない問題であり、これに関しても今後継続して共同研究を進めたい。

今回の共同研究期間中に開催された「日本=フィンランド光工学シンポジウム」は、以前から継続して行われており、今回の共同研究に参加した東大と東フィンランド大に限らず、多くの大学、研究機関の研究者が参画している。しかしながら、その開催は、個々の研究者同士の研究交流がベースとなっており、世代交代も進行中である。その意味で、本共同研究で強まった、Kamshilin グループとわれわれの間のつながりが、また新たな日本=フィンランド光工学シンポジウムの運営の核となりうる。次回は 2013 年 9 月 2 日～5 日に宇都宮大学で開催され、その次は 2015 年にフィンランドでの開催となる。

7. 主な論文発表・特許等（5 件以内）

相手側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	I. Yoshimine, A. Kamshilin, E. Nippolainen, T. Satoh, R. Fujimura, K. Kuroda, and T. Shimura, "Induction of linear photogalvanic current in gallium phosphide by femto-second light pulses"	準備中